

文章编号: 0258-7025(2009)12-3204-06

大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 (邀请论文)

王华明¹ 张述泉¹ 王向明²

(¹ 北京航空航天大学大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191)
² 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110037)

摘要 简要介绍大型钛合金结构件激光直接制造的技术特点及其在航空航天等工业装备中的应用前景, 重点报道大型钛合金结构件激光直接成形制造工艺、内部质量控制和应用研究进展。深入评述大型钛合金结构件激光直接成形制造技术发展面临的问题及其热物理、熔池非平衡冶金动力学、内部组织快速凝固和内部缺陷控制的复杂性。指出零件“变形和开裂”预防和“内部质量”控制是目前制约该技术发展和应用的关键“瓶颈难题”, 只有加强对零件“内应力演化规律与变形开裂行为”及“凝固组织形成规律及内部缺陷形成机理”等基础问题的研究和认识, 才能有效解决上述瓶颈难题。

关键词 激光技术; 激光直接制造; 钛合金; 金属结构件; 航空航天

中图分类号 TN249; TG146.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3204

Progress and Challenges of Laser Direct Manufacturing of Large Titanium Structural Components (Invited Paper)

Wang Huaming¹ Zhang Shuquan¹ Wang Xiangming²

(¹ *Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing of Large Metal Components, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*
² *Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang, Liaoning 110037, China*)

Abstract The technological and economic advantages of laser direct manufacturing of large titanium structural components in comparison to the traditional forging process are briefly summarized and their industrial application potentials in the aerospace industries are prospected. State of the art on processing optimization, microstructure and mechanical properties control, equipment development and engineering applications in aerospace industries are reported. The technological challenges facing the further development of the technology is reviewed. Physical and metallurgical complexities of laser direct manufacturing of large titanium structural components are analyzed with a special emphasis on the thermal physics of the deposition process, extraordinary metallurgical kinetics of the laser induced high-temperature melt pool, the forming mechanisms of the unique non-equilibrium rapidly solidified structures and various inherent internal defects. It is pointed out that efficient prevention of “component distortion and cracking” as well as control of “internal structure and defects” are currently the two “bottle-neck” obstacles challenging the further development and industrial applications of the revolutionary advanced manufacturing technology. Intensive basic research and more fundamental understanding on the non-steady state evolution and interaction behaviors of internal stresses and the forming mechanisms of rapid solidification microstructures and internal defects are needed in order to effectively overcome the above “bottle-neck” problems.

Key words laser technique; laser direct manufacturing; titanium alloys; metals structural components; aerospace

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-10-24

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA041904)、国家 973 计划 (2006CB605206, 2010CB731705)、国家杰出青年基金 (50625413) 和教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT0805) 资助项目。

作者简介: 王华明 (1962—), 男, 教授, 工学博士, 主要从事高性能金属材料快速凝固激光制备与大型金属构件激光直接制造技术等方面的研究。E-mail: wanghm@buaa.edu.cn

本文彩色效果请查阅中国光学期刊网 (<http://www.opticsjournal.net>) 相关文献。

1 引言

钛合金具有密度低、强度高、耐腐蚀等突出优点,在先进战机、大型飞机、高推重比航空发动机及工业重型燃气轮机等装备中的用量越来越大^[1~7],例如,波音 787 大型客机中钛合金结构件用量已超过机体结构重量的 15%,美国第四代战机 F-22 中钛合金结构件用量更高达 41%,高推比航空发动机中钛合金用量达 25%~40%。同时,为有效降低装备结构重量、提高装备性能、使用寿命和可靠性,飞机、航空发动机等装备均需越来越多地采用钛合金大型整体结构。事实上,大型整体钛合金关键结构件用量的高低,已成为衡量现代飞机和航空发动机等重大装备技术先进性的重要标志之一。

采用整体锻造等传统方法制造大型钛合金结构件,工序长、工艺复杂,对制造技术和制造装备的要求高,成形技术难度大,不仅需要万吨级以上的重型液压锻造工业装备、大规格锻坯加工及大型锻造模具制造,而且零件加工去除量大、数控加工时间长、材料利用率低、生产周期长、制造成本高(例如,美国 F-22 飞机中尺寸最大的 Ti6Al4V 钛合金整体加强框,零件重量不足 144 kg,而其毛坯模锻件重达 2796 kg,材料利用率不到 4.90%,数控加工周期长达半年以上)。大型整体钛合金关键结构件成形制造技术,被国内外公认为是对飞机、发动机、燃气轮机等重大工业装备研制与生产具有重要影响的核心关键制造技术之一^[1~3]。

钛合金结构件激光快速成形技术是以钛合金粉末为原料,通过激光熔化/快速凝固逐层沉积“生长制造”,由零件 CAD 模型一步完成全致密、高性能钛合金结构件的“近净成形制造”^[2~8]。与整体锻造等传统制造技术相比,具有以下特点:1) 无需大型锻造工业装备、大型锻造模具制造及大规格锻坯制备加工;2) 高性能钛合金材料的制备与大型钛合金零件的“近净成形”一步完成;3) 零件机械加工余量小、数控加工时间短、材料利用率高、生产周期短、制造成本低;4) 零件具有细小、均匀的激光“原位”冶金/快速凝固组织,综合力学性能优异;5) 柔性高、响应快等。该技术是一种“变革性”的数字化、先进“近净成形”技术,为大型钛合金结构件的低成本、短周期、近净成形制造提供了一条新的技术途径,在先进战机、大型飞机、高推重比航空发动机、重型燃气轮机等重大工业装备的研制生产中具有重要的应用前景。

但是,大型整体钛合金结构件激光快速成形过

程中物理、化学、力学和材料冶金现象极其复杂,技术难度很大,国内外对钛合金零件激光快速成形内部组织形成规律和内部缺陷形成机理、零件内应力演化规律及变形开裂行为等关键基础问题缺乏深入的认识和研究,国际上除我国以北京航空航天大学 and 沈阳飞机设计研究所为核心的“产学研”研究团队近期取得的可喜成果外,在突破零件“变形和开裂”预防和“内部质量”控制等一直制约着飞机大型整体钛合金主承力结构件激光快速成形技术发展和应用的重大“瓶颈”难题上未能取得实质性进展。本文简要报道飞机钛合金大型主承力结构件激光快速成形技术的研究进展,并分析了该技术发展面临的挑战和急需解决的关键基础问题。

2 大型钛合金结构件激光直接制造技术研究进展

高性能金属零件激光直接成形技术,于 1995 年在美国首先被提出,随即在国际上迅速发展,成为受到广泛关注的“高性能材料制备与复杂零件直接近净成形一体化”新技术。由于其对大型钛合金结构件成形制造的突出优势及其在飞机等装备研制生产中的广阔应用前景,过去十几年来一直是激光先进制造技术领域的前沿研究热点,并受到政府和工业部门的高度关注和资助,研究进展迅速。

国外有关大型钛合金结构件激光快速成形技术的研究主要集中在美国。1995~2005 年间,在美国国防部先进研究计划署(DARPA)及海军研究办公室(ONR)等部门的巨额资助下,美国约翰哈普金斯大学、宾夕法尼亚州立大学及 MTS 公司等对飞机钛合金结构件激光快速成形技术进行了大量研究并取得重大进展^[1,2],在此基础上,1998 年由 MTS 公司独资成立了专门从事飞机钛合金结构件激光快速成形制造技术研发和工程化应用的 AeroMet 公司,与波音、诺克希德·马丁及诺斯罗普·格鲁曼等美国三大军用飞机制造商合作,在美国空军“锻造计划”(Air Force's Forging Initiative)、陆军制造技术计划(Army's Mantech Program)、国防部“军民两用科技计划”(Dual Use Science and Technology Program)等资助下,致力于飞机钛合金结构件激光快速成形技术研究及其在飞机上的应用关键技术研究。2000 年 9 月在波音和诺克希德·马丁公司完成了对激光快速成形钛合金全尺寸飞机机翼结构件的地面性能考核试验,激光快速成形钛合金构件的

静强度及疲劳强度达到飞机设计要求。2001年 AeroMet 公司开始为波音公司 F/A-18E/F 舰载联合歼击/攻击机小批量试制发动机舱推力拉梁、机翼转动折叠接头、翼梁、带筋壁板等机翼钛合金次承力结构件。2002年制定出了“Ti6Al4V 钛合金激光快速成形产品”宇航材料标准(ASM 4999)并于同年在世界上率先实现激光快速成形钛合金次承力结构件在 F/A-18 等战机上的验证考核和装机应用。

然而,令人遗憾的是,由于未能有效解决激光快速成形大型钛合金结构件内部质量和力学性能控制等关键技术难题,其激光快速成形 Ti6Al4V 等钛合金结构件,即使再经热等静压(HIP)、开模锻造(open-die forging)等后续致密化加工,其疲劳等关键力学性能仍然显著低于钛合金锻件(如图1所示^[2],优于铸件而低于锻件),难以取代锻件实现其在飞机主承力构件上的应用,AeroMet 公司最终于2005年12月被迫停业关闭。

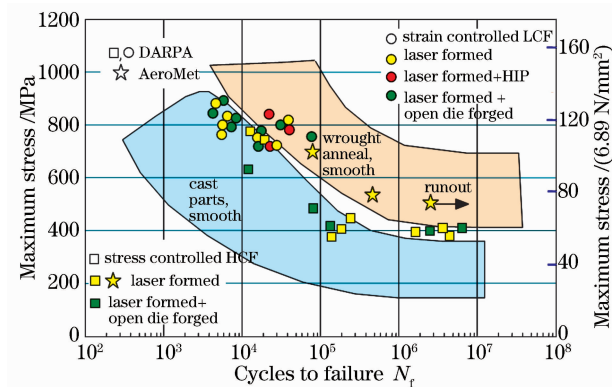


图1 美国原 AeroMet 公司激光成形 Ti6Al4V 合金的疲劳性能(激光成形态,激光成形+HIP,激光成形+开模锻造态疲劳性能均低于钛合金锻件而优于铸件)

Fig.1 Fatigue properties of the laser deposited Ti6Al4V alloy (as-laser deposited, laser deposition + HIP and laser deposition + forging) of the former AeroMet corporation, which are at the high end of cast counterpart and the low end of the forged alloy

我国钛合金结构件激光快速成形技术的研究,从2001年开始一直受到政府主要科技管理部门的高度重视,国家自然科学基金委员会、国家“863”计划、国家“973”计划等国家主要科技研究计划,均将钛合金激光直接成形制造技术作为重点和重大项目予以持续资助。北京航空航天大学、西北工业大学、北京有色金属研究总院等单位,在飞机、发动机等钛合金结构件激光快速成形制造工艺研究、成套装备

研发及工程应用关键技术攻关等方面取得了较大进展^[5~10]。

“十五”期间,北京航空航天大学与沈阳飞机设计研究所等单位“产学研”紧密结合,突破了飞机钛合金次承力结构件激光快速成形工艺及应用关键技术,构件疲劳、断裂韧性等主要力学性能达到钛合金模锻件水平,2005年7月成功实现激光快速成形 TA15 钛合金飞机角盒,TC4 钛合金飞机座椅支座及腹鳍接头等4种飞机钛合金次承力结构件在3种飞机上的装机应用,成为当时继美国原 AeroMet 公司之后世界上第二个实现激光快速成形钛合金结构件在飞机上实际装机应用的研究团队。

“十一五”期间,北京航空航天大学在飞机钛合金大型整体主承力结构件激光快速成形工艺研究、工程化成套装备研发与装机应用关键技术攻关等方面取得了突破性进展^[8],为有效解决激光快速成形钛合金大型整体主承力结构件“变形开裂”预防、“凝固组织和内部缺陷”控制和“力学性能”优化等一直制约该技术发展的“瓶颈难题”找到了一条新路,主要研究进展为:

1) 提出原创性的“热应力离散控制”新方法,为有效突破大型钛合金主承力结构件激光快速成形过程零件严重翘曲变形与开裂“瓶颈难题”找到了一条新路,激光快速成形制造出了单件重量逾50~200 kg的多种大型整体钛合金飞机关键结构件试验件及迄今国内尺寸最大的大型整体钛合金飞机主承力结构件(图2)并得到装机应用。

2) 提出激光快速成形大型钛合金主承力结构

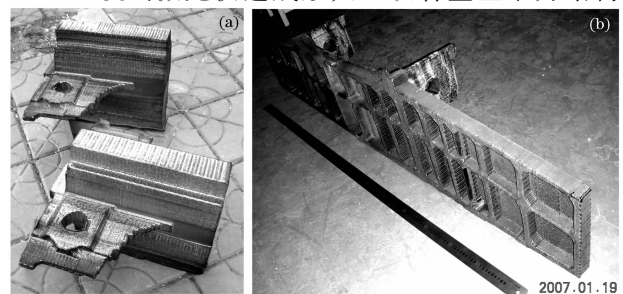


图2 激光快速成形 TA15 钛合金飞机主承力结构件工艺样件实物照片。(a) 单件重量逾50 kg的大型飞机接头;(b) 尺寸逾1730 mm×250 mm×230 mm的飞机主承力梁

Fig.2 Photographs showing the laser deposited TA15 titanium aircraft main load-bearing structural components. (a) large aircraft fittings weighing over 50 kg; (b) aircraft frame with a dimension over 1730 mm×250 mm×230 mm

件凝固晶粒尺寸、晶粒形态和晶体取向主动控制新方法,实现了对零件凝固组织的主动控制(图 3)。

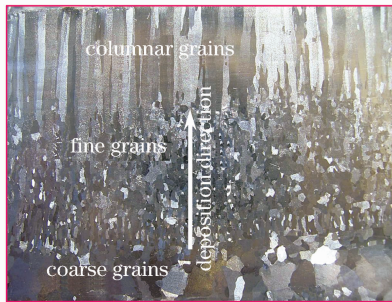


图 3 激光快速成形 TA15 钛合金大型构件凝固晶粒形态、尺寸和取向的主动控制

Fig. 3 Optical micrograph illustrating the active control on as-solidified grain size, grain morphology and growth texture of a laser deposited TA15 titanium alloy large structural component

3) 发明激光快速成形双相钛合金“特种热处理”新工艺,获得综合力学性能优异的“特种双态显微组织”新形态[图 4(a)所示],使激光快速成形钛合金的综合力学性能显著提高,疲劳裂纹扩展速率降低一个数量级以上[图 4(b)],为提高飞机等钛合

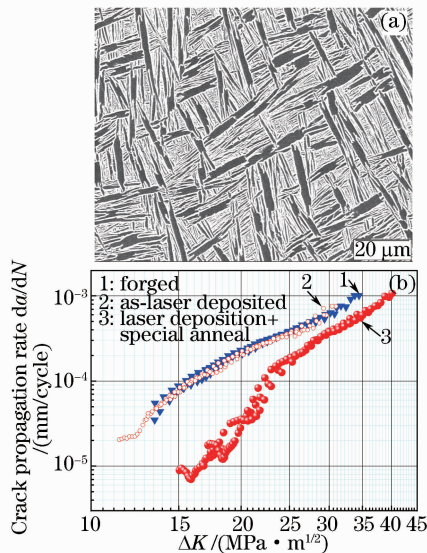


图 4 (a) 激光快速成形 TA15 钛合金飞机大型结构件特种热处理“特种双态显微组织”;(b) 特种热处理对疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的影响

Fig. 4 (a) Scanning electron microscope (SEM) micrograph showing the special bimodal microstructure of a laser deposited TA15 titanium alloy structural component after special annealing treatment; (b) its effect on fatigue crack propagation rate in comparison to the forged counterpart

金主承力构件的使用安全性和损伤容限性能找到了一条新路。

4) 初步突破激光快速成形 TA15 钛合金大型结构件内部缺陷和内部质量控制及其无损检验关键技术,飞机构件综合力学性能达到或超过钛合金模锻件,其中,缺口疲劳极限超过钛合金模锻件近 50%(图 5)、高温持久寿命较模锻件提高 4 倍(在 500 °C/480 MPa 试验条件下的高温持久寿命,锻造 TA15 钛合金为 48.6 h,激光直接成形钛合金长达 235 h)、疲劳裂纹扩展抗力提高一个数量级[图 4(b)]。

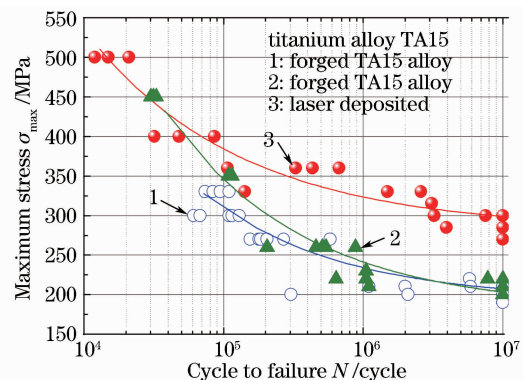


图 5 激光快速成形 TA15 钛合金大型结构件及 TA15 模锻件缺口试样(缺口系数 $K_t=3$, 应力比 $R=0.1$)疲劳性能对比

Fig. 5 Notch fatigue properties (notch coefficient $K_t=3$, stress ratio $R=0.1$) of laser deposited TA15 titanium alloy in comparison to the forged counterpart

5) 研制出了具有“原创”关键技术、迄今世界最大的飞机钛合金大型结构件激光快速成形工程化成套装备(零件激光熔化沉积真空腔尺寸达 4000 mm × 3000 mm × 2000 mm),初步建立起全套飞机钛合金大型整体主承力构件激光快速成形工艺规范和配套应用技术标准,研究成果已在飞机上得到应用。

3 面临的挑战及需解决的基础问题

大型整体钛合金关键结构件的激光快速成形,通过长期逐层逐点激光熔化沉积/快速凝固“材料添加”实现零件的“近净成形”,零件成形过程中同时发生着“激光/粉末相互作用”、“移动熔池的形成及其激光超常冶金与非稳态热质传输”、超高温梯度边界条件不断变化条件下“移动熔池熔体的快速凝固”、三维零件“内部凝固组织和内部缺陷的形成”、复杂约束和非平衡相变条件下零件“内应力的形成和演化”等十分复杂的材料冶金、物理、化学和热力

耦合现象。

零件在激光成形过程中经历的高能激光束的长期周期性剧烈加热和冷却、移动熔池在池底强约束下的快速凝固收缩及其伴生的短时非平衡循环固态相变,在零件内部产生很大、极其复杂的热应力、组织应力和机械约束应力及其强烈非稳态交互作用和应力集中,导致零件严重变形与开裂,事实上零件“变形开裂预防”是制约该技术应用、迄今世界上尚未有效解决的“第一大”瓶颈难题。

在大型整体钛合金构件长时间激光熔化沉积成形过程中,移动熔池激光超常冶金动力学行为及其在超高温梯度作用下非平衡快速凝固形核和长大过程,直接决定了最终零件的晶粒形态、尺寸、晶体取向、晶界结构、化学成分均匀性并表现出对激光快速成形过程的高度敏感性及其复杂多变性,给成形零件内部组织和力学性能一致性控制带来巨大困难。与此同时,在大型整体钛合金构件长期循环往复激光熔化逐点逐层局部沉积成形过程中,主要工艺参数、外部环境、熔池熔体状态的波动、扫描填充轨迹的变换等一切不连续和不稳定现象,都可能在零件内部沉积层与沉积层之间、沉积道与沉积道之间、单一沉积层内部等局部区域产生各种特有的内部冶金缺陷(如层间未熔合、道间局部未熔合、气隙、卷入性和析出性气孔、加杂物、内部特殊裂纹等)并影响最终成形零件的内部质量、力学性能和使用安全。事实上,内部组织和内部缺陷控制一直是制约大型钛合金结构件激光快速成形技术发展和应用的又一重大“瓶颈难题”。

在解决激光成形过程中零件严重“变形开裂”和“内部缺陷和内部组织”控制等长期制约该技术应用的重度“瓶颈难题”上,除北京航空航天大学取得了可喜突破外,国内外迄今一直未能取得实质性进展,致使目前大型金属构件激光快速成形技术研究在国际上落入“低潮”,国际上大部分从事激光快速成形技术研究的单位大多转向零件“激光修复”领域,这种趋势在今年三月美国激光学会(LIA)举行的激光快速成形研讨会上(LAM'2009)得到充分体现,激光修复成为与会全部 24 个报告的主要议题。

迄今国内外一直未能有效解决零件“变形和开裂”预防和“内部质量”控制等重度“瓶颈难题”,是致使其目前陷入低潮的主要原因,一方面是由于该技术应用和研究的历史还很短,对该技术的研究尚处于工艺尝试探索阶段,更重要的原因是对其共性关键基础问题还缺乏认识和深入研究。笔者认为,大

型金属构件激光快速成形技术研究能否从目前的“低谷”中走出来并得到持续发展,在很大程度上将取决于人们对大型金属构件激光快速成形过程内应力演化行为规律、内部缺陷形成机理和内部组织形成规律等关键基础问题的研究深度和认识程度。要实现大型整体钛合金结构件激光快速成形过程内应力的有效控制和零件变形开裂的有效预防,有效解决一直制约大型金属结构件激光快速成形技术发展的“第一大瓶颈难题”,必须首先认识清楚:1) 周期性长期激光剧烈热循环作用下零件“热应力”的演化规律及其与激光快速成形工艺条件与扫描填充模式及零件结构的关系;2) 周期性、高温梯度、剧烈加热和冷却过程中材料的短时非平衡固态相变“组织应力”形成规律及其和激光快速成形工艺条件和零件结构的关系;3) 超高温梯度作用下移动熔池“凝固收缩应力”形成机理、演化规律及其与激光快速成形工艺条件和零件结构之间的关系;4) 热应力、组织应力、凝固收缩应力和外约束应力的非稳态耦合行为、演化规律和零件变形开裂之间的关系。而要实现激光快速成形大型钛合金结构件“内部质量”的有效控制,必须深入认识以下问题:1) 移动熔池激光超常冶金动力学及其快速凝固形核、生长、局部凝固组织特征及其与激光快速成形工艺参数和激光成形条件之间的相互关系;2) 移动熔池局部快速凝固行为和三维成形零件凝固组织形成规律之间的关系;3) 移动熔池局部凝固过程和零件特有内部冶金缺陷形成规律间的关系。总之,应对大型金属结构件激光快速成形技术“变形开裂”和“内部质量”控制两大“瓶颈难题”的最有效措施,是加强对零件“内应力演化规律与变形开裂行为”及“凝固组织形成规律及内部缺陷形成机理”等关键基础问题的研究和认识。

4 结 论

1) 大型整体钛合金关键结构件激光直接制造技术是一种“变革性”的短流程、低成本、数字化、先进“近净成形”新技术,与传统整体锻造等制造技术相比,具有十分独特的技术和经济优势,在大型飞机、高推重比航空发动机、重型蒸汽轮机等重大工业装备研制和生产中具有广阔的应用前景。

2) 零件“变形和开裂”预防和“内部质量”控制是制约大型整体钛合金关键结构件激光直接制造技术发展和应用的关键“瓶颈难题”。

3) “变形开裂”和“内部质量”控制等两大“瓶颈

难题”的有效解决和大型金属结构件激光快速成形技术的发展,有赖于对零件“内应力演化规律与变形开裂行为”及“凝固组织形成规律及内部缺陷形成机理”等基础问题的深入认识。

参 考 文 献

- 1 R. R. Boyer. An overview of titanium use in the aerospace industry [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 1996, **213**(1-2):103~114
- 2 F. G. Arcella, F. H. Froes. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming [J]. *JOM*, 2000, **52**(5):28~30
- 3 P. A. Kobryn, S. L. Semiatin. The laser additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. *JOM*, 2001, **53**(9):40~42
- 4 E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada *et al.*. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. *Intern. J. Machine Tools and Manufacturing*, 2006, **46**(12-13):1459~1468
- 5 Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An *et al.*. Rapid solidification laser advanced materials processing and manufacturing [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(10):962~967
王华明,张凌云,李安等.金属材料快速凝固激光加工与成形[J].北京航空航天大学学报,2004,**30**(10):962~967
- 6 Wang Huaming, Li An, Zhang Lingyun *et al.*. Mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloys [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (7):26~29
王华明,李安,张凌云等.激光熔化沉积快速成形TA15钛合金的力学性能[J].航空制造技术,2008,(7):26~29
- 7 Wang Huaming. Research progress on laser melting deposition manufacturing of high performance aeronautical metallic structural components [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005, (12):26~28
王华明.航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展[J].航空制造技术,2005,(12):26~28
- 8 Liu Yong, Li Yanmin, Huang Xiaoping *et al.*. Microstructure of laser net shape manufactured Ti-6Al-4V [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(S1):163~166
刘勇,李延民,黄小平等. Ti-6Al-4V合金的激光净成形制造及其显微组织[J].中国激光,2007,**34**(S1):163~166
- 9 Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy [J]. *Rare Metals Materials and Engineering*, 2007, **36**(2):211~215
张凤英,陈静,谭华等.钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J].稀有金属材料与工程,2007,**36**(2):211~215
- 10 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Tang Haibo *et al.*. Research progress on laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2008, **44**(6):28~30
王华明,张述泉,汤海波等.大型钛合金结构件激光快速成形技术研究进展[J].航空精密制造技术,2008,**44**(6):28~30